

# 海啸波对斜坡堤爬高试验研究

刘鑫<sup>1</sup>, 吕迎雪<sup>2,3</sup>, 李江峰<sup>1</sup>, 张文忠<sup>2,3</sup>, 丁广佳<sup>2,3</sup>

(1. 中广核工程有限公司核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518172; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;  
3. 中国交建海岸工程水动力重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** 为更好的评估海啸波作用于斜坡堤的爬高, 通过在无反射造波机水槽中造孤立波模拟海啸与斜坡堤作用。分析了海啸波沿斜坡堤的最大爬高, 得到了扭王字块、栅栏板和大块石3种护面结构, 1:1.5和1:2两种坡度下的试验数据。与有关学者提出的经验公式进行了比较, 并考虑坡面不同护面的糙率影响, 提出了新的爬高公式。成果表明, 新提出的爬高经验公式与大量的实测数据相关性很好。

**关键词:** 海啸波; 斜坡堤; 最小二乘法拟合; 物理模型试验

中图分类号: U652.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2020)01-0038-04

doi: 10.7640/zggwjs202001008

## Experimental research for tsunami wave run-up on sloping breakwater

LIU Xin<sup>1</sup>, LÜ Ying-xue<sup>2,3</sup>, LI Jiang-feng<sup>1</sup>, ZHANG Wen-zhong<sup>2,3</sup>, DING Guang-jia<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518172, China; 2. CCCC Tianjian Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;  
3. CCCC Key Hydrodynamic Laboratory for Coastal Engineering, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** In order to evaluate the impact of tsunami wave climbing along the sloping breakwater, the solitary wave was produced in the absorbing wave maker tank to simulation the interaction between the tsunami and the slop breakwater. The maximum tsunami wave run-up height was analyzed, the experimental data of three kinds of protective structures, i.e. the accropode armour, the barrier board and the stone at slope 1:1.5 and 1:2 were obtained. Compared with the empirical formula with other relevant studies, and considering the influence of roughness of different armour, a new formula of the maximum tsunami run-up height along the sloping breakwater was proposed. The results show the good correlation between the new empirical formula and a large number of measured data.

**Key words:** tsunami wave; sloping breakwater; least square fitting; physical model test

## 0 引言

2011年3月福岛第一核电站因受海啸侵袭发生事故后, 国内核电厂进行了安全排查, 对地震海啸等外部灾害进行了复核评估。由于我国沿海自然条件特点, 以往国内对海啸的关注和研究相对较少, 对海啸与构筑物作用方面缺少资料和工程技术经验。海啸波本质上是一种长波, 具有明

显的单一波峰形状, 其波高及水深相对于波长来说均为小值, 属于浅水长波。由于孤立波的波形与传播特性与海啸波类似, 并且其波形函数简单易于数学解析, 因此常以孤立波模拟海啸传播变形。同时海啸模型试验研究也随着造波系统可以准确模拟孤立波而得到了快速发展, 由孤立波传播的变形试验为相关的数值模拟提供了重要的基础资料。

国外 Hall&Watts<sup>[1]</sup>最早在实验室研究了孤立波沿缓坡传播后波浪的变形, Synolakis(1987年)<sup>[2]</sup>根

收稿日期: 2019-08-30 修回日期: 2019-11-03

作者简介: 刘鑫(1980—), 男, 辽宁辽阳人, 硕士, 高级工程师, 防灾减灾工程及防护工程专业。E-mail: liuxin@cgnpc.com.cn

据 1:20 的斜坡试验结果得出孤立波最大爬坡高度的估算公式。Hsiao 等(2008)<sup>[3]</sup>根据试验结果利用最小二乘法归纳出斜坡在一定倾角范围内破碎孤立波爬高, 国内张文忠<sup>[4]</sup>通过物理模型试验提出了两种坡率的海啸波爬坡公式。“311 地震”发生以后, 日本的研究学者针对防海啸防波堤护面及基床的稳定性开展了一系列研究工作, Mikami 等(2012)<sup>[5]</sup>首先对海啸中不同结构形式的防波堤破坏情况进行了实地调查。Esteban 等(2012a)<sup>[6]</sup>提出了护面块体抗海啸波的设计参数计算公式, 但是这个公式只是通过日本东北部的 2 个港口的分析得出, 因此公式应用有局限性。Hanzawa 等(2012)<sup>[7]</sup>以及 Kato 等(2012)<sup>[8]</sup>也提出了计算海啸波作用下的护面块体的设计公式, 这个公式里考虑了流速及越浪的影响, 但其中参数获取较困难, 较难应用。

根据工程上的需要, 针对两种坡度、不同护面块体的斜坡式防波堤结构断面进行了海啸波作用物理模型试验, 得到了不同水深波高工况下海啸波沿斜坡堤的爬高数据, 并将试验结果与前人的经验公式进行了对比, 加入了糙渗系数, 提出了改进的海啸波沿斜坡堤爬高的经验公式, 为以后工程上的实际应用提供参考依据。

## 1 物理模型试验概况

### 1.1 试验设备

海啸波对斜坡堤断面物理模型试验是在中交天津港湾工程研究院有限公司水工研究所的无反射造波机试验水槽中进行。水槽的长度、宽度、高度分别为 68.0 m、1.0 m 和 1.6 m。造波机系统由造波板、伺服电机、造波机控制器、计算机控制系统和数据采集、分析系统组成。该造波机系

统是 2005 年 6 月从日本三井造船株式会社引进, 是国内成功引进的第一座无反射造波机成套设备。该系统可以在 0.5~4.5 s 的周期范围内模拟不同谱型的不规则波和特定形式的非线性波, 并可以在水槽中生成孤立波模拟海啸。

### 1.2 试验布置及观测方法

无反射造波水槽一端安有造波机, 尾端铺设大块石进行消波。本次试验在水槽中为测量海啸波在斜坡堤上的爬高变形过程及最大爬坡高度, 在沿水槽方向布置了 13 支波高计, 其中 4 支波高计安装在防波堤堤脚前及堤身上方, 8 支波高计安放在静水位以下的堤前缓坡地形上方, 1 支波高计安放在造波机前方的平底地形区域。海啸波作用到防波堤上的爬高位置采用波高计测量及目测同步进行, 互相校核其观测结果。图 1 给出了试验布置示意图。

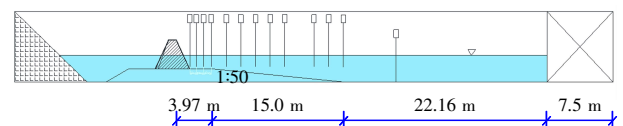


图 1 海啸波沿斜坡堤爬高试验仪器及模型布置图

Fig. 1 Instrument and model layout of tsunami wave run-up on sloping breakwater

### 1.3 试验模型

本次试验研究选取了 11 个有代表性的斜坡堤断面, 分别考虑了 1:1.5 和 1:2 的护面坡度, 护面结构选取了 489 g 扭王字块体、115 g 扭王字块体、80~100 g 大块石、40~50 g 大块石以及栅栏板等形式。表 1 为各断面的结构形式说明, 图 2 为试验的无防浪墙斜坡堤断面示意图。

表 1 试验斜坡堤结构形式

Table 1 Type list of test sloping breakwater

断面序号	防浪墙	堤顶标高/m	肩台	肩台标高/m	护坡坡度	护面形式
1 号	无	0.77	无	—	1:1.5	489 g 扭王字块体
2 号	无	0.77	无	—	1:1.5	80~100 g 大块石
3 号	有	0.77	有	0.646	1:1.5	栅栏板
4 号	有	0.77	有	0.646	1:1.5	40~50 g 大块石
5 号	有	0.77	有	0.680	1:1.5	115 g 扭王字块体
6 号	无	0.77	无	—	1:2	489 g 扭王字块体
7 号	有	0.77	有	0.612	1:2	115 g 扭王字块体
8 号	有	0.77	有	0.646	1:2	栅栏板
9 号	无	0.77	无	—	1:2	80~100 g 大块石
10 号	有	0.77	有	0.672	1:2	80~100 g 大块石
11 号	无	0.77	无	—	1:2	40~50 g 大块石

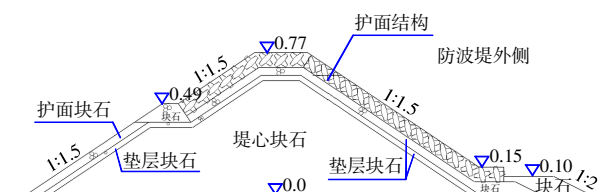


图2 无防浪墙斜坡堤断面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sloping breakwater without wall

### 1.4 试验工况

为了在防波堤堤前得到更大范围的波高水深比,所有斜坡堤均安放在 1/50 斜坡后方的平台上,平台高度为 30 cm,堤前水深  $d$  设计了 3 种工况,分别为 0.2 m、0.3 m 及 0.45 m,对应的造波板前水深分别为 0.5 m、0.6 m 和 0.75 m。定义防波堤前海啸波高为  $H$ ,不同水深下堤前波高水深比范围可达到 0.07~1.24 范围内,每个试验断面分别进行了 28 组试验,试验工况详见表 2。

表2 试验水深、波高工况组合

Table 2 Test conditions of water depth and wave height

造波机前入射波高水深比	堤前水深 $d$ /m	堤前入射波高水深比 $H/d$	造波机前入射波高水深比	堤前水深 $d$ /m	堤前入射波高水深比 $H/d$
0.057	0.20	0.17	0.228	0.30	0.58
0.093	0.20	0.28	0.263	0.30	0.68
0.132	0.20	0.43	0.289	0.30	0.76
0.167	0.20	0.57	0.035	0.45	0.07
0.208	0.20	0.74	0.060	0.45	0.11
0.241	0.20	0.89	0.089	0.45	0.17
0.269	0.20	1.03	0.115	0.45	0.22
0.310	0.20	1.24	0.142	0.45	0.27
0.047	0.30	0.11	0.165	0.45	0.31
0.075	0.30	0.18	0.187	0.45	0.35
0.111	0.30	0.27	0.214	0.45	0.41
0.140	0.30	0.34	0.236	0.45	0.45
0.173	0.30	0.43	0.247	0.45	0.47
0.201	0.30	0.51	0.262	0.45	0.50

### 1.5 试验海啸波(孤立波)模拟

本次试验采用水槽中生成孤立波来模拟海啸波,目前孤立波的试验模拟普遍采用 Goring (1978)的造波板运动计算方法<sup>[9]</sup>。理论波形与造波机实际造出的试验波形对比见图 3。

另外孤立波的波速及流速在试验前也分别进行了验证,且与理论值符合较好,整体看,本次试验可以正确模拟孤立波。

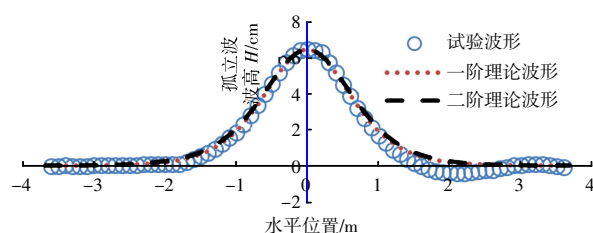


图3 试验波形及理论波形对比图

Fig. 3 Comparative diagram of test wave shape and theoretical wave shape

## 2 结果讨论

### 2.1 海啸波沿斜坡堤爬高特性分析

图 4、图 5 分别给出坡度为 1:1.5 以及 1:2 的斜坡堤断面无量纲爬高测量结果,并且与 Synolakis (1987 年)<sup>[2]</sup>理论推导海啸波爬坡高度公式 ( $\frac{R}{d}=2.831(\cot \beta)^{\frac{1}{2}}(\frac{H}{d})^{\frac{5}{4}}$ )进行了对比,其中定义  $R$  为海啸波爬坡高度。根据临界破碎估算公式  $\frac{H}{d}=0.8183(\cot \beta)^{-\frac{10}{9}}$  计算出临界破碎的堤前波高水深比,即 1:1.5 坡度和 1:2 坡度临界破碎波高水深比分别为 0.52 和 0.38。由图中结果可以看出在波高水深比小于临界破碎值时,斜坡堤上爬波与 Synolakis (1987 年)<sup>[2]</sup>提出的公式估算值整体趋势基本一致,均略有偏小,这种情况应该是本研究不同护面层的糙渗系数影响所致。

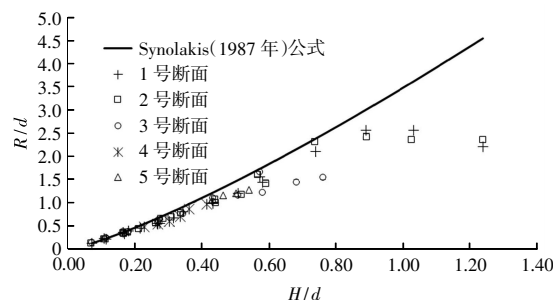


图4 坡度为 1:1.5 斜坡堤海啸波最大无量纲爬高

Fig. 4 Tsunami maximum dimensionless climbing height of seawall with a slope of 1:1.5

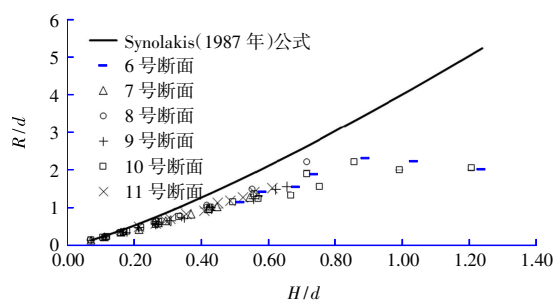


图5 坡度为 1:2 斜坡堤海啸波最大无量纲爬高

Fig. 5 Tsunami maximum dimensionless climbing height of seawall with a slope of 1:2

## 2.2 海啸波沿斜坡堤最大爬高经验公式

由图 4、图 5 可以看出海啸波爬高的实测结果在波浪临界破碎前后的规律不甚相同, 研究学者把爬高经验公式分为波浪非破碎以及破碎两种情况。在现实中通常叠加天文高潮情况下海啸爬高漫顶的危害更大, 这时通常波高水深比较小, 不会发生破碎, 因此本研究采用波浪未破碎的爬高数据进行拟合, 得到海啸波沿斜坡堤最大的爬高拟合公式。

本文利用 Synolakis(1987 年)<sup>[2]</sup>提出的爬高估算公式与本次试验中未发生越浪的数据进行相关性分析, 见图 6, 经计算判定系数为 0.880 8。

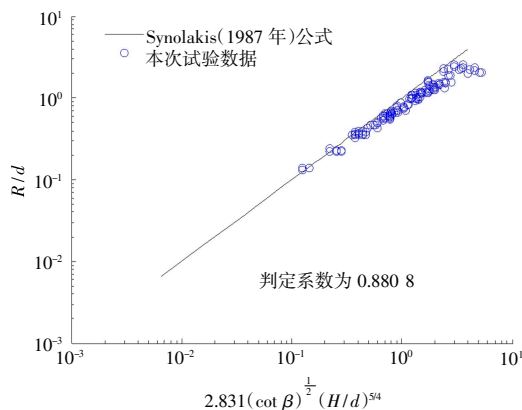


图 6 Synolakis(1987 年)公式与本次试验数据相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between Synolakis(1987 年) formula and test data of this paper

可以看到本次试验数据比 Synolakis 的估算公式略偏小, 但整体规律较一致。试验观察不同护面形式的无量纲化爬高由小到大排序为: 489 g 扭王字块体 < 115 g 扭王字块体 < 栅栏板 (80~100 g 块石) < 40~50 g 块石。可以发现不同种类的护面块体对爬高有明显影响, 故本文在 Synolakis 推算的爬高函数形式基础上, 增加了一个描述护面块体的糙渗系数  $K_\Delta$ 。经过最小二乘法的非线性拟合得到海啸波沿不同护面结构形式的斜坡堤最大爬高经验公式, 其形式为:

$$\frac{R}{d} = 2.606 \cdot 2(\cot \beta)^{-0.128 \cdot 76(K_\Delta)^{0.128 \cdot 8} \left(\frac{H}{d}\right)^{0.937 \cdot 02}}$$

式中:  $d$  为堤前水深;  $H$  为堤前海啸波高;  $\beta$  为斜坡的坡度角。经过拟合其判定系数可达到 0.932,  $K_\Delta$  对于扭王字块体、栅栏板、块石分别取 0.47、0.50 和 0.55<sup>[2]</sup>, 拟合的相关性分析见图 7。

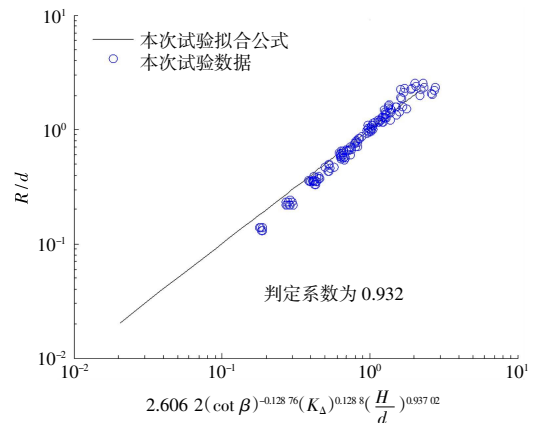


图 7 本文拟合公式与本次试验数据相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between fitting formula and test data in this paper

经过数据分析, 发现对于斜坡堤坡度角在 1.5~2 的断面来说, 堤前波高水深比小于 0.3 的情况下, Synolakis(1987 年)<sup>[2]</sup>的估算公式更接近实测值, 本次拟合公式比实测值偏大; 但是随着波高水深比的增大本次试验拟合的结果更接近实测值, 因此在工程设计使用时, 应根据实际海啸波情况选择适当的估算方法。

## 3 结语

本次研究在无反射造波水槽中产生孤立波模拟海啸, 作用在斜坡式防波堤, 得到了扭王字块、栅栏板和大块石 3 种护面结构, 1:1.5 以及 1:2 两种坡度下的试验数据。经分析得到以下主要结论:

1) 堤前波高水深比小于临界破碎值时, 斜坡堤上爬坡高度与 Synolakis(1987 年)<sup>[2]</sup>提出的公式估算值整体趋势基本一致, 但均略有偏小。

2) 通过最小二乘法拟合海啸波沿斜坡堤爬高的试验数据, 考虑不同护面的糙渗系数影响, 提出了新的海啸波沿斜坡堤最大爬高的估算公式, 其判定系数为 0.932。

3) 本次研究的斜坡堤断面组数还比较少, 下一阶段需要更多的水槽试验对不同坡度、更多类型护面块体、不同重量的结构断面进行研究, 对本文新提出的公式进行逐步修正。

## 参考文献:

- [1] HALL J V, WATTS J W. Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes [M]. Tech. Memo. 33 Beach Erosion Board, USACE, 1953.
- [2] SYNOLAKIS C E. The runup of solitary waves[J]. Fluid Mechanics, 1987, 185: 523-545.

(下转第 60 页)